

# ВЫБОР ПРИНЦИПА РЕГУЛИРОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИНДУКЦИОННЫХ ТИГЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ С ПРОВОДЯЩИМ ТИГЛЕМ

Федин М.А.

НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия, [FedinMA@mpei.ru](mailto:FedinMA@mpei.ru)

**Аннотация** — Проведен обзор установок индукционных тигельных печей с проводящим тиглем, выпускаемых в России и за рубежом. Разработаны методики электрического и теплового расчета индукционных тигельных печей с проводящим тиглем. Изложены принципы и проведена идентификация индукционных тигельных печей с графитовым тиглем для плавки меди и сплавов как объектов управления. Предложен принцип регулирования электрического и теплового режимов работы печей с проводящим тиглем мощностью до 100 – 150 кВт, питающихся от транзисторных преобразователей высокой частоты. В пакете *MATLAB* разработана двухпозиционная система регулирования температуры металла в печи. С использованием полученных результатов создана лабораторно-промышленная установка для плавки меди, магния и сплавов.

**Ключевые слова** — индукционная тигельная печь, проводящий тигель, плавка меди, плавка магния, структурная модель индукционной печи, двухпозиционная система регулирования температуры металла, транзисторный преобразователь высокой частоты.

## ВВЕДЕНИЕ

Индукционные тигельные печи (ИТП) широко применяются в промышленности для плавки черных и цветных металлов, в частности качественных медных и магниевых сплавов. В зависимости от электрических свойств материала тигля различают ИТП с непроводящим и проводящим тиглем.

К первой группе относятся печи с диэлектрическим керамическим тиглем, предназначенные для плавления металлов. В таких печах загрузка (садка) нагревается индуцированным в ней током, тигель же эквивалентен воздушному зазору.

Ко второй группе относятся печи со стальным, графитовым или графито-шамотным тиглем, обладающим большей или меньшей электропроводностью. Если толщина стенки тигля более чем вдвое превышает глубину проникновения тока в материал тигля, то можно считать, что индуцированный ток сосредоточен в стенке тигля, загрузка же прогревается только путем теплопередачи и может не обладать электропроводностью. При меньшей толщине стенки тигля электромагнитное поле проникает в загрузку, и энергия выделяется как в стенке тигля, так и в самой загрузке, если она электропроводна. Печи с проводящим тиглем имеют теплоизоляцию.

В настоящее время в России и за рубежом выпускаются ИТП с проводящим стальным тиглем для

плавки магния емкостью от 300 кг до 8 т (мощностью от 120 кВт до 1200 кВт соответственно) и печи с графитовым тиглем для плавки меди емкостью от 1 кг до 6 т (мощностью от 2 кВт до 1500 кВт).

Современные установки ИТП требуют автоматизации проводимого в них технологического процесса, контроля и управления электрических (напряжение, ток, мощность,  $\cos\varphi$ ) и технологических параметров (температура металла). Поскольку плавильные ИТП, в частности рассматриваемые ИТП с проводящим тиглем, являются достаточно инерционными в тепловом отношении объектами, практика показывает, что систему регулирования электрическим и тепловым режимом в печах мощностью до 100 – 150 кВт можно строить по двухпозиционному принципу. Источниками питания таких печей, как правило, являются транзисторные преобразователи частоты, работающие как в продолжительном, так и в повторно-кратковременном режимах. Для выбора параметров системы регулирования печи необходима идентификация ИТП с проводящим тиглем как объекта системы управления с последующим встраиванием модели печи в структурную модель системы регулирования в *MATLAB* [1 – 2].

## РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ, ОПИСЫВАЮЩЕЙ НАГРЕВ САДКИ

В качестве объекта исследования выберем ИТП с графитовым тиглем для плавки металлов. Печь питается от высокочастотного транзисторного преобразователя мощностью 2,5 кВт с рабочей частотой 22 кГц. Транзисторный преобразователь состоит из неуправляемого двухполупериодного мостового выпрямителя, фильтра, управляемого транзисторного инвертора на транзисторах *MOSFET* и с частотным регулированием выходной мощности, а также согласующего трансформатора. Коэффициент полезного действия преобразователя составляет не менее 0,94. Охлаждение преобразователя – воздушное, индуктора – водяное. Для охлаждения индуктора используется замкнутая система водяного охлаждения с объемом накопительной емкости 110 л и погружной помпой производительностью 2 л/мин. На рис. 1 показан чертеж системы «индуктор – загрузка» печи с геометрическими размерами. Объем тигля составляет 140 см<sup>3</sup>. Масса тигля – 0,35 кг. Тигель изготовлен из графита марки ГМЗ. На рисунке уровень металла в тигле (отметка 57 мм) соответствует 1 кг меди.

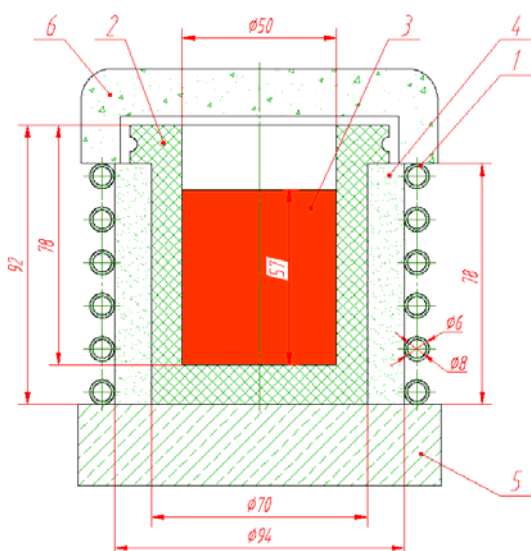


Рис. 1. Чертеж системы «индуктор – загрузка» печи с футеровкой:

1 – индуктор; 2 – тигель; 3 – металл; 4 – керамическая вставка; 5 – подина; 6 – крышка

Электрический расчет печи проведен в универсальном конечно-элементном пакете программ ELCUT 6.0 (профессиональная версия). В результате решения задачи магнитного поля переменных токов получены интегральные результаты для случая графитового тигля без металла и тигля с медью (масса меди около 1000 г). На рис. 2 представлены рассчитанные распределения удельной объемной мощности тепловыделения для обоих этих случаев, а в табл. 2 сведены основные интегральные результаты расчета.

Табл. 1. Основные результаты расчета печи с тиглем без металла и тиглем с медью

Параметр системы «индуктор – загрузка»	Тигель без металла	Тигель с медью
Ток индуктора $I_1$ , А	180	
Напряжение индуктора $U_1$ , В	49	48,5
Частота $f$ , Гц	22000	22000
Мощность в индукторе $P_1$ , Вт	144	143
Мощность в тигле $P_2$ , Вт	1680	870
Мощность в меди $P_3$ , Вт	0	90
$\cos\varphi$	0,207	0,126

Из результатов расчета видно, что наличие в графитовом тигле жидкой меди (в расчетах удельное сопротивление меди принималось равным  $2,15 \cdot 10^{-7}$  Ом·м) оказывает существенное влияние на параметры системы «индуктор – загрузка». Это предъявляет особые специфические требования к работе источника питания – транзисторного инвертора напряжения.

Поскольку на этапе технологического процесса плавки металла в ИТП с проводящим тиглем загрузка тигля представляет собой кусковую шихту, отдельные куски которой в электрическом отношении практически не связаны между собой, а индуцированные токи

замыкаются в основном в пределах каждого куска, эквивалентное сопротивление такой кусковой загрузки в несколько раз превосходит аналогичное значение у жидкой меди, поэтому на этом этапе наличием в тигле металлической (в частности медной) шихты можно пренебречь и использовать результаты, полученные для тигля без металла. Это было подтверждено экспериментально.

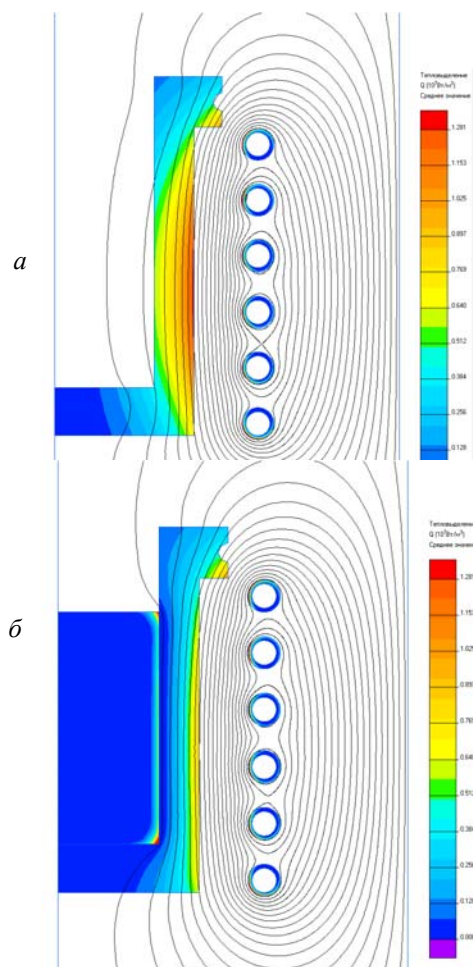


Рис. 2. Распределение удельной объемной мощности тепловыделения в индукторе и загрузке печи:

а – графитовый тигель без металла; б – графитовый тигель с медью

Тепловой расчет печи проводился с использованием пакета ELCUT и аналитических формул. Тепловые потери печи делятся на потери через боковую теплоизоляционную вставку 4, крышку 6 и подину 5 (рис. 1).

С целью упрощения структурной модели печи получены аппроксимирующие полиномы для суммарных тепловых потерь печи при работе без крышки (1) и с крышкой (2):

$$P_{m\Sigma} = 1.09 \cdot 10^{-6} \cdot t_2^3 - 5.5 \cdot 10^{-4} \cdot t_2^2 + 0.913 \cdot t_2 - 31 \quad (1)$$

$$P_{m\Sigma} = 1.221 \cdot t_2 - 19. \quad (2)$$

Расчеты с использованием аналитических формул подтверждены в пакете ELCUT, в котором решались стационарная и нестационарная задача теплопередачи.

# ИДЕНТИФИКАЦИЯ ИНДУКЦИОННОЙ ТИГЕЛЬНОЙ ПЕЧИ С ПРОВОДЯЩИМ ТИГЛЕМ КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Энергетический баланс ИТП с графитовым тиглем без металла

$$P_{инв.вх.} = \Delta P_{инв} + P_1 + c \cdot m \cdot \frac{dt}{d\tau} + P_{m\Sigma}, \quad (3)$$

где  $P_{инв.вх.}$  – мощность на входе инвертора,  $\Delta P_{инв}$  – потери активной мощности в инверторе,  $P_1$  – электрические потери в индукторе,  $c$  – среднее значение удельной эквивалентной теплоемкости тигля с футеровкой на интервале температур 20 – 1300 °С,  $m$  – масса тигля с футеровкой,  $\tau$  – время [3 – 5].

Зададимся значениями мощностей – составляющих энергетического баланса (3). Поскольку электрофизические свойства графита марки ГМЗ при нагреве до 1200 – 1300 °С меняются незначительно, электрический режим работы печи является стабильным, т.е. напряжение и ток инвертора практически не меняются. Зададимся напряжением на выходе инвертора 48 В и током индуктора 180 А, тогда из электрического расчета  $P_1=140$  Вт. В этом режиме работы активная мощность на входе инвертора  $P_{инв.вх.}=2040$  Вт при КПД инвертора (вместе с согласующим трансформатором) 0.94, поэтому  $P_{инв.вх.} - \Delta P_{инв}=1920$  Вт. С учетом этих данных составим структурную модель печи в пакете *MATLAB/Simulink* (рис. 3).

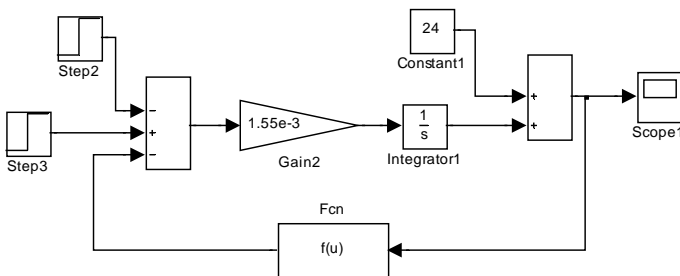


Рис. 3. Структурная модель ИТП в *MATLAB*

Блок *Step3* задает активную мощность на входе инвертора с учетом потерь в преобразователе  $P_{инв.вх.} - \Delta P_{инв}$ , блок *Step2* – мощность электрических потерь в индукторе, блок *Fcn* – функциональную зависимость между температурой садки и суммарными тепловыми потерями печи. Тогда активная мощность на входе инвертора транзисторного преобразователя за вычетом потерь в инверторе и согласующем трансформаторе, потерь в индукторе и тепловых потерь, представляющая собой полезную мощность, идущую на нагрев, поступает на блок *Gain2*, в котором задается коэффициент

усиления  $\frac{1}{c \cdot m} = 1,55 \cdot 10^{-3} \text{ кг}^2 \cdot \text{К/Дж}$ , являющийся

коэффициентом усиления интегрирующего звена. На выходе интегрирующего звена получаем приращение температуры за определенное время. Это приращение складывается с начальной температурой, равной температуре окружающей среды, в результате получаем осредненное значение температуры проводящего тигля.

Как известно, интегрирующее звено

$$W(p) = \frac{1}{c \cdot m} \cdot \frac{1}{p}, \quad \text{охваченное внутренней}$$

отрицательной обратной связью, представляет собой инерционное звено первого порядка. Но, поскольку в данном случае внутренняя отрицательная обратная связь, охватывающая интегрирующее звено (рис. 3), является нелинейной (формула (1)), представить ИТП, работающую без крышки, в виде инерционного звена нельзя.

В случае же работы печи при закрытой крышке, когда обратная связь линейна (функциональная зависимость в блоке *Fcn* на рис. 3 задается уравнением (2)), а коэффициент усиления, заданный в блоке *Gain2*, равен  $2,55 \cdot 10^{-3} \text{ кг}^2 \cdot \text{К/Дж}$ , в результате пересчета параметров структурной схемы рис. 3 в этом случае получим передаточную функцию индукционной печи, соответствующую передаточной функции инерционного звена первого порядка

$$W_n(p) = \frac{k}{1 + T \cdot p}, \quad (4)$$

где  $k=0.81 \text{ °С/Вт}$  – коэффициент передачи,  $T=330 \text{ с}$  – постоянная времени печи.

Упрощенная структурная модель печи представлена на рис. 4, а на рис. 5 показаны кривые изменения температуры печи от времени, полученные в *MATLAB* для случая работы печи с открытой (кривая 1) и закрытой крышкой (кривая 2).

На рис. 5 также нанесены точки, полученные на экспериментальной установке (кривые 3, 4). На рисунке видно, что расчетная кривая хорошо совпадает с результатами эксперимента. Поэтому расчетную (теоретическую) кривую нагрева можно использовать для определения температуры садки и за пределами «экспериментального» диапазона. Установившаяся температура нагрева в печи без крышки составляет около 1100 °С в верхней части тигля и около 1220 °С в нижней части и на дне тигля, при работе с крышкой – около 1450 °С. Эти значения температуры являются предельно достижимыми при тех параметрах установки, которые были приняты выше.

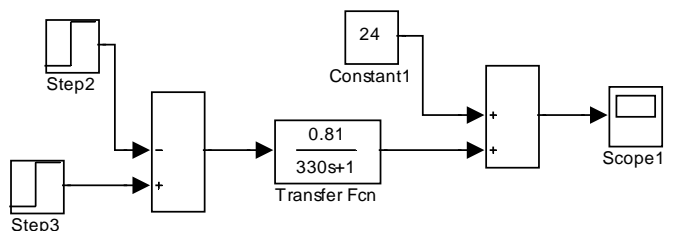


Рис. 4. Упрощенная структурная модель ИТП в *MATLAB*

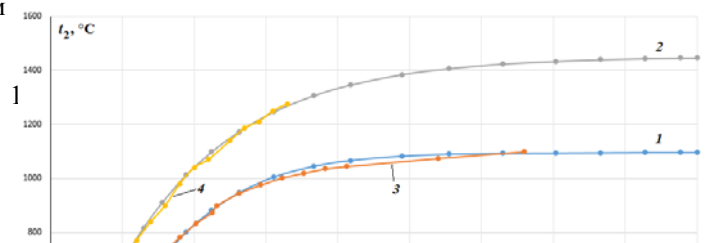


Рис. 5. Кривые изменения температуры печи от времени для случая работы с открытой (1, 3) и закрытой крышкой (2, 4)

Наличие в проводящем тигле металла приводит к увеличению постоянной времени печи. Так, коэффициент усиления, заданный в блоке *Gain2* (рис. 3) уменьшается (увеличивается коэффициент  $c \cdot t$  в уравнении (3) в зависимости от значения удельной теплоемкости расплавляемого металла и его массы). Для случая плавки меди массой 1000 г коэффициенты в блоке *Gain2* рис. 3 для случаев работы без крышки и с крышкой, коэффициент  $k$  и постоянная времени  $T$  из формулы (4) получают равными соответственно:  $1.1 \cdot 10^{-3} \text{ кг}^2 \cdot \text{К/Дж}$ ,  $2.15 \cdot 10^{-3} \text{ кг}^2 \cdot \text{К/Дж}$ ,  $0.8 \text{ °C/Вт}$  и  $620 \text{ с}$ .

#### РАЗРАБОТКА ДВУХПОЗИЦИОННОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ МЕТАЛЛА В ПЕЧИ

В пакете *MATLAB* получим с использованием разработанной структурной модели ИТП для плавки меди и медных сплавов структурную модель двухпозиционной системы регулирования температуры садки в печи для режима нагрева, расплавления и выдержки меди в печи с закрытой крышкой (рис. 5).

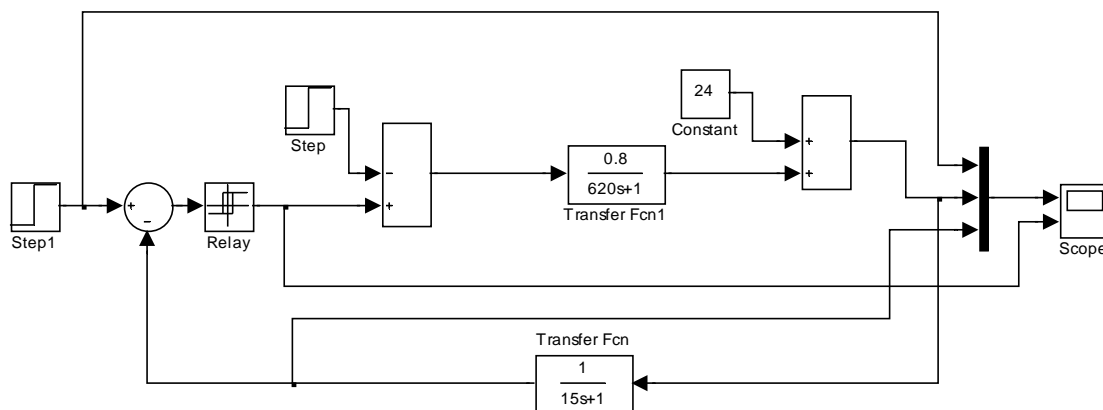


Рис. 5. Структурная модель двухпозиционной системы регулирования температуры ИТП в режиме нагрева, расплавления и выдержки расплава меди

Блок *Step1* задает задание по температуре, блок *Relay* задает ширину петли гистерезиса, т.е. размах колебаний температуры в квазиустановившемся режиме изменения

температуры при двухпозиционном регулировании. Во внешней отрицательной обратной связи включено инерционное звено первого порядка, задающее датчик температуры, с передаточной функцией

$$W_{\text{dm}}(p) = \frac{k_{\text{dt}}}{1 + T_{\text{dt}} \cdot p}, \quad (5)$$

где  $k_{\text{dt}}=1$  – коэффициент передачи датчика температуры,  $T_{\text{dt}}=15 \text{ с}$  – постоянная времени датчика температуры [6].

В качестве датчика температуры используется хромель-алюмелевая термопара (типа *K*) с предельной рабочей температурой  $1300 \text{ °C}$ .

На рис. 6 приведены переходные процессы изменения температуры садки печи, сигнала с термопары и выходной мощности транзисторного преобразователя частоты в режиме нагрева, расплавления и выдержки расплава меди. Задание по температуре печи –  $1120 \text{ °C}$ , ширина размаха колебаний –  $10 \text{ °C}$  ( $1110 - 1120 \text{ °C}$ ). Как видно из приведенных переходных процессов печь работает в режиме, близком к предельному, поскольку интервалы, соответствующие работе печи, существенно превышают интервалы пауз в работе установки в режиме квазиустановившихся колебаний температуры. Также видно, что в данном случае инерционность датчика температуры незначительно влияет на характер переходных процессов, поскольку постоянная времени используемой термопары невелика.

С использованием разработанных методик и модели системы регулирования можно проводить настройку системы регулирования температуры садки ИТП, работающей в двухпозиционном режиме, в зависимости от емкости печи, мощности источника питания, уровня задающего воздействия, изменения возмущающих воздействий – электрических потерь в преобразователе, в индукторе, тепловых потерь, а также в зависимости от постоянной времени используемой термопары (без защитного чехла, с защитным чехлом).



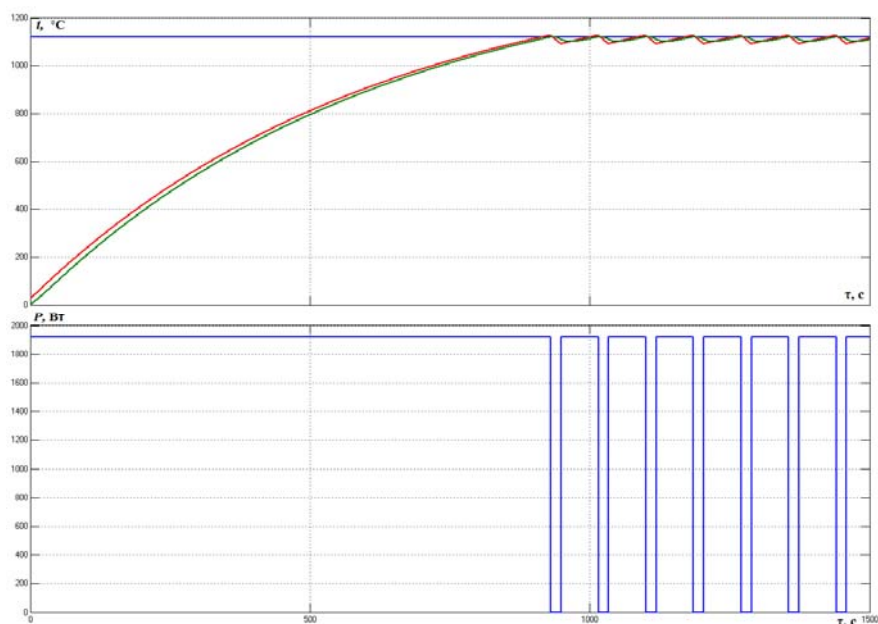


Рис. 6. Переходные процессы изменения задания температуры (1), температуры садки печи (2), сигнала с термопары (3) (а) и выходной мощности транзисторного преобразователя частоты (б)

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для экспериментальных исследований в НИУ «МЭИ» создан лабораторно-промышленный стенд на базе ИТП с проводящим тиглем для плавки меди мощностью 2,5 кВт, питающейся от транзисторного преобразователя высокой частоты. Общий вид стенда дан на рис. 7.



Рис. 7. Общий вид лабораторно-промышленного стенда

Для регулирования величины входного напряжения используется однофазный лабораторный автотрансформатор *Fnex* мощностью 3 кВА. Для регулирования температуры используется цифровой регулятор температуры *OMRON E5CC*. В экспериментальных исследованиях использовалось следующее измерительное оборудование: тепловизор *FLIR T425* с диапазоном измерения температуры от -20

до 1200 °С, двухканальный цифровой осциллограф *Tektronix TDS 1012B*, хромель-алюмелевые термопары (типа *K*), стрелочные вольтметр, амперметр, ваттметр, фазометр, цифровые вольтметры, цифровой мультиметр, цифровой трехканальный измеритель-регистратор температуры *Aktakom ATE-9380*, трансформаторы тока и напряжения.

В стенде реализована система управления температурой садки, построенная по двухпозиционному принципу. Настройки используемого терморегулятора *OMRON E5CC* позволяют задавать температуру нагрева и ширину петли гистерезиса, определяющую размах колебаний температуры в процессе регулирования. В системе регулирования, основанной на прямом измерении температуры, используется погружная многоразовая хромель-алюмелевая термопара (типа *K*) с защитным чехлом, выдерживающим несколько погружений в жидкий металл.

На рис. 8 приведены фотографии и тепловизионные изображения тигля с медной шихтой (а, б) и тигля с жидкой медью (в, г). Рис. 8а соответствует времени нагрева около 15 мин, рис. 8в – моменту, предшествующему сливу металла. Первоначальная загрузка медной шихты производилась в холодный тигель, затем через некоторое время по мере расплавления и осаживания шихты были произведены две дозагрузки. Суммарная масса расплавленной меди составила около 1 кг, общее время расплавления – около 19 мин, температура перегрева – 1120 °С. После полного расплавления наблюдался выпуклый мениск высотой 3 – 4 мм.

Настройки регулятора при выплавке меди: температура задания – 1120 °С, размах колебаний температуры в процессе регулирования – 10 °С (от 1110 до 1120 °С). Характер переходных процессов аналогичен приведенным на рис. 6. Переходные процессы

совпадают с теоретическими, полученными в *MATLAB*, с точностью не менее 5%.

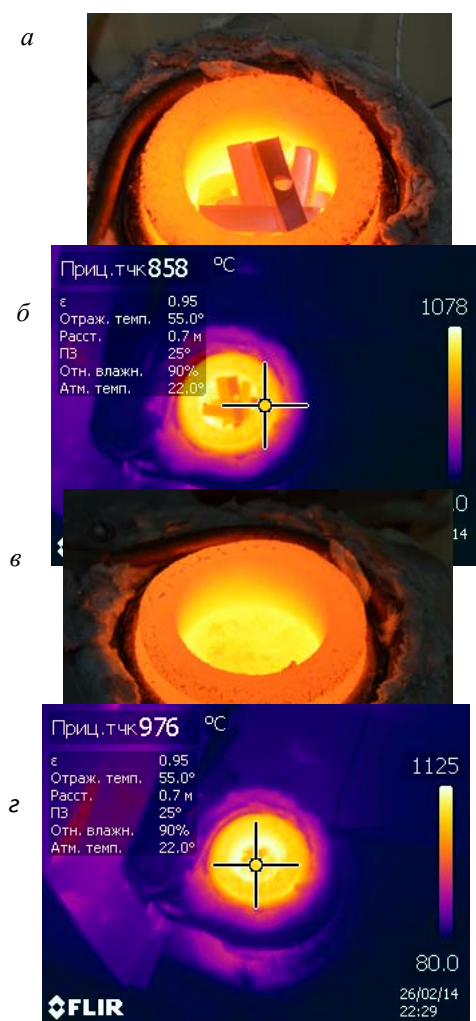


Рис. 8. Фотографии и тепловизионные изображения тигля с шихтой (а, б) и жидким расплавом (в, г)

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны методики электрического и теплового расчета ИТП с проводящим тиглем.
2. Установлено, что в случае, когда проводящий тигель является частично прозрачным для электромагнитной волны, суммарная мощность тепловыделения в тигле с расплавленным металлом становится меньше, чем мощность тепловыделения в проводящем тигле без металла при одинаковых токе индуктора и частоте.
3. Проведена идентификация ИТП с проводящим тиглем как объектов управления в зависимости от режима работы печи. Установлено, что ИТП с проводящим тиглем, работающая с закрытой крышкой, может быть представлена инерционным звеном первого порядка, при работе с открытой крышкой – нелинейной структурной схемой. Для ИТП, используемой в экспериментальном стенде, коэффициент передачи печи составил около 0,8 °C/Вт, постоянная времени – 330 с для печи без металла и 620 с для печи с металлом.

4. Получена структурная модель двухпозиционного регулятора температуры садки ИТП с проводящим графитовым тиглем для плавки меди. Приводятся рекомендации по настройке регулятора.

5. Установлено, что поскольку рассматриваемые ИТП с проводящим тиглем являются достаточно инерционными в тепловом отношении объектами (постоянная времени тигля, как правило, составляет более 300 с), систему регулирования электрическим и тепловым режимом в печах мощностью до 100 – 150 кВт можно строить по двухпозиционному принципу. Источниками питания таких печей, как правило, являются транзисторные преобразователи частоты, работающие как в продолжительном, так и в повторно-кратковременном режимах. Использовать для регулирования температуры ПИД-регулирование здесь не имеет особого смысла.

6. Создан лабораторно-промышленный стенд на базе ИТП мощностью 2,5 кВт, работающей на частоте 22 КГц, позволяющий проводить выплавку меди и сплавов, осуществляя разливку при заданной оператором температуре, выдерживать жидкий металл при определенной температуре.

7. Разработанные модели регулятора температуры садки ИТП с проводящим тиглем проверены с использованием экспериментальной установки. Отличия по температуре садки не превышают 5%, что вполне приемлемо.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Автоматическое управление электротермическими установками: Учебник для вузов / А.М. Кручинин, К.М. Махмудов, Ю.М. Миронов и др.; Под ред. А.Д. Свенчанского. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
2. Шекалов А.А., Штрейс Я.И., Блинов Б.В. Плавка в малых индукционных печах. М. – Л., Изд. «Машиностроение», 1965.
3. А.Б. Кувалдин, М.А. Федин. Идентификация индукционных тигельных миксеров как объектов параметрической системы управления. Индукционный нагрев, №1 (23), 2013. С. 19 – 24.
4. Kuvaldin A.B., Fedin M.A. Development of a system of regulation induction melting installations with indirect estimates of the temperature load. Workshop Elektroprozessetechnik. Tagungsband, Ilmenau, 2013.
5. Гитгарц Д.А. Автоматизация плавильных электропечей с применением микро-ЭВМ. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
6. Электрооборудование и автоматика электротермических установок: (Справочник) / Альтгаузен А.П., Бершицкий И.М., Бершицкий М.Д. и др.; Под ред. А.П.Альтгаузена, М.Д.Бершицкого. М.Я.Смеянского, В.М.Эдемского. – М.: Энергия, 1978.